

ОТЗЫВ

**на автореферат диссертации Харченко Антона Александровича
«Оптическое поглощение и излучение в волноводных гетероструктурах GaAs/AlGaAs
с активной областью на основе квантовых яма-точек InGaAs», представленной на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.11 – физика полупроводников**

Диссертационная работа Харченко А.А. посвящена экспериментальному исследованию оптических и оптоэлектронных свойств нового типа полупроводниковых наноструктур – квантовых яма-точек InGaAs/GaAs, а также приборных гетероструктур на их основе. В последние десятилетия низкоразмерные полупроводниковые структуры являются одним из ключевых объектов исследований в области физики полупроводников и нанофотоники благодаря возможности управления энергетическим спектром носителей заряда и создания эффективных источников и приемников излучения для оптической передачи информации, фотонных интегральных схем, сенсорики и фотоэлектрических преобразователей.

Наиболее распространёнными активными средами для полупроводниковых оптоэлектронных приборов ближнего инфракрасного диапазона являются квантовые ямы и квантовые точки. Использование квантовых ям позволяет получать высокие значения оптического усиления за счёт большой плотности состояний, однако дальнейшее увеличение числа слоев и расширение спектрального диапазона ограничивается накоплением упругих напряжений и возникновением дефектов. В свою очередь, квантовые точки обладают рядом преимуществ, связанных с трёхмерной локализацией носителей заряда, но их относительно низкая поверхностная плотность зачастую ограничивает величину насыщенного оптического усиления. В связи с этим особый интерес представляет разработка и исследование гибридных наноструктур, способных объединить преимущества квантовых ям и квантовых точек.

Рассмотренные в диссертационной работе квантовые яма-точки InGaAs являются перспективным типом активной области, сочетающим высокую плотность состояний и возможность формирования многослойных структур без существенного ухудшения кристаллического качества. Однако ввиду относительной новизны данных объектов ряд фундаментальных свойств, таких как природа оптических переходов, величина насыщенного усиления, поляризационные свойства и особенности лазерной генерации, ранее оставались недостаточно изученными. Поэтому тема данной диссертационной работы, безусловно, является актуальной.

При выполнении диссертационной работы был получен целый ряд важных как в фундаментальном, так и в прикладном отношении результатов. Автором проведены комплексные экспериментальные исследования волноводных гетероструктур GaAs/AlGaAs с активной областью на основе квантовых яма-точек InGaAs, включающие спектроскопию фоточувствительности, измерения с поляризационным разрешением, исследование спектральных характеристик и режимов генерации полупроводниковых лазеров.

Одним из наиболее значимых результатов работы является предложенный автором аналитический подход для разделения вклада конструкции волновода и свойств активной

области в величину модального поглощения и усиления. Данный подход позволил провести корректное сравнение различных типов низкоразмерных активных областей без необходимости точного определения фактора оптического ограничения, что особенно важно для неоднородных систем, таких как квантовые точки и квантовые яма-точки.

С использованием предложенного подхода было проведено прямое сопоставление квантовых яма-точек InGaAs/GaAs и самоорганизованных квантовых точек InAs/InGaAs по величине насыщенного модального усиления. Было установлено, что структуры с квантовыми яма-точками обладают примерно на порядок большим насыщенным усилением по сравнению с квантовыми точками в сопоставимых волноводных гетероструктурах. Данный результат демонстрирует значительный потенциал квантовых яма-точек для использования в мощных полупроводниковых лазерах, суперлюминесцентных диодах, фотодетекторах и других приборах интегральной фотоники.

Важным фундаментальным результатом является исследование природы оптических переходов в квантовых яма-точках. На основании измерений фоточувствительности с поляризационным разрешением автором показано, что основной оптический переход связан с состояниями тяжёлых дырок, а возбужденный (коротковолновый) переход — с состояниями лёгких дырок, что свидетельствует о близости энергетической структуры квантовых яма-точек к квантовым ямам InGaAs. Полученные результаты создают основу для дальнейшего развития физических моделей данных гибридных наноструктур.

Отдельно следует отметить исследование поляризационных свойств волноводных фотодиодов с активной областью на основе квантовых яма-точек. Автором впервые установлена зависимость степени поляризационной анизотропии фоточувствительности от эффективной длины взаимодействия излучения с активной областью. Полученные закономерности могут быть использованы для разработки фотоприёмных устройств с заданной чувствительностью к поляризации входного излучения.

Практически значимым результатом является исследование лазерных диодов на основе квантовых яма-точек. Было показано, что в отличие от аналогичных лазеров на основе квантовых ям, структуры с квантовыми яма-точками способны сохранять генерацию через основной оптический переход при высоких уровнях электрической накачки без возникновения генерации через возбуждённые состояния. Данное свойство представляет интерес для создания стабильных полупроводниковых источников излучения.

По представленному в автореферате материалу можно высказать следующие замечания:

1) При обсуждении результатов исследования двухуровневой лазерной генерации автором утверждается следующее: «... КЯ, где насыщенное усиление на переходе ES продолжает расти с насыщением усиления на GS [A5, A6]». Данное утверждение видится не до конца корректным, поскольку насыщенное усиление или же максимально достижимое является константой, характеризующей активную область. Вряд ли насыщенное усиление может расти с ростом уровня накачки.

2) В работе убедительно показано преимущество квантовых яма-точек по величине насыщенного усиления относительно самоорганизованных квантовых точек InAs. Вместе с тем представляло бы интерес более подробное сопоставление температурной

стабильности приборных характеристик лазеров на основе квантовых яма-точек с традиционными структурами на основе квантовых ям и квантовых точек.

Эти замечания, однако, не носят принципиального характера и не умаляют значимости представленного автором материала. Полученные результаты обладают высокой степенью новизны и имеют важное значение для развития представлений о физических свойствах низкоразмерных полупроводниковых структур, а также для разработки перспективных приборов интегральной фотоники. Об уровне и степени новизны представленных результатов также свидетельствует их публикация в рецензируемых научных журналах, а также апробация на российских и международных научных конференциях.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Харченко Антона Александровича «Оптическое поглощение и излучение в волноводных гетероструктурах GaAs/AlGaAs с активной областью на основе квантовых яма-точек InGaAs» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

Ученая степень: кандидат физико-математических наук

Должность: старший научный сотрудник

Место работы: Санкт-Петербургский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ - Санкт-Петербург)

_____/ Махов Иван Сергеевич /
«14» 04 2026 г.

эл. почта: imahov@hse.ru

тел.: 644-59-11 (доб. 61561)

почтовый адрес: НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 25-я линия, 6, корп. 1, 199106

Ис